

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PEROVSKİT TABANLI ESNEK AMBİPOLAR İNCE FİLM
TRANSİSTÖRLER

TUĞBA DEĞİRMENCİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2017

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PEROVSKİT TABANLI ESNEK AMBİPOLAR
İNCE FİLM TRANSİSTÖRLER

TUĞBA DEĞİRMENCİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF.DR. SAVAŞ BERBER

GEBZE
2017

T.C.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

PEROVSKITE- BASED FLEXIBLE
AMBIPOLAR THIN FILM TRANSISTORS

TUĞBA DEĞİRMENCİ
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF PHYSICS

THESIS SUPERVISOR
PROF.DR. SAVAŞ BERBER

GEBZE

2017

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 22/06/2017 tarih ve 2017/34 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 20/07/2017 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Tuğba Değirmenci'nin tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) :Prof. Dr. Savaş BERBER

ÜYE

:Prof. Dr. Mevlüt KARABULUT

ÜYE

:Prof. Dr. Kemal ÖZDOĞAN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Doç. Dr. Arif Çağdaş AYDINOĞLU
Gebze Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Bu tez çalışmasında, literatürde sıralı kaplama olarak anılan bir yöntem kullanılarak $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskit filmi elde edildi. Üretilen $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ filmlerinin karakterizasyonu için kalınlık ölçümlerinde profilometre cihazı, pürüzlülük ölçümlerinde ise Atomik Kuvvet mikroskobu (AFM) kullanıldı. Tanecik boyutu ve sınırı incelemeleri için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri alındı. Absorbans ölçümlerinde spektrofotometre, X ray dağılım ölçümlerinde ise X-ray difraktometre sistemi kullanıldı. Perovskit filminin absorbans başlangıcının yaklaşık 1.6 eV'lik bir bant aralığına tekabül ettiği ve literatür ile uyumlu olduğu görüldü. İnce film transistör fabrikasyonu için, öncelikle, ITO kaplı cam alttaş üzerinde alttan kapılı cihaz geometrisi üzerine çalışıldı. ITO tabakası üzerine kapı dielektriği ve perovskit tabakası dönel kaplanarak şekillendirildi. Son olarak termal buharlaştırma metodu ile Alüminyum savak kaynak elektrotları oluşturuldu. Kapı elektrotu olarak ise ITO tabakası kullanıldı. Kapı dielektriği olarak farklı kalınlıklarda SU8 ve spin on glass gibi malzemeler kullanıldı. Bu malzemeler kullanılarak üretilen cihazlarda kapılama davranışı gözlemlenemediğinden kapı dielektriği olarak SiO_x kullanılmasına karar verildi. Bunun üzerine Sabancı Üniversitesi SUNUM Laboratuvarındaki Oxford PECVD sisteminde silisyum yonga üzerinde 300 nm SiO_x film büyütüldü. SiO_x film üzerinde yukarıda anlatılan yöntemler kullanılarak perovskit filmi kaplandı. Gölge maske metodu ile gümüş savak kaynak elektrotları kaplanarak alttan kapılı TFT cihazlar tamamlandı. Bu cihazlarda her ne kadar kapılama davranışı belirgin şekilde gözlemlenmese de kaçak akım probleminin büyük oranda çözüldüğü görüldü. Bunun üzerine gümüş elektrotlar ile perovskit filmi arasına C_{60} kaplanarak ohmik kontak oluşturulmaya çalışıldı. C_{60} kullanılarak gerçekleştirilen cihazlarda kapılama davranışı gözlemlenerek p ve n tipi alan etkili mobilite değerleri hesaplandı.

Anahtar Kelimeler: perovskit, ince film transistör, ekran teknolojileri.

SUMMARY

In this thesis, a production method called as sequential coating was performed in order to obtain $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskite films. Surface profilometer and atomic force microscope (AFM) was used for thickness profile and roughness measurements respectively. Scanning Electron Microscope (SEM) images were obtained for grain size and boundary inspections. X-ray diffraction and absorbance measurements were performed by X-ray diffractometer and spectrophotometer systems respectively. The absorbance on-set of the perovskite film corresponded to a bandgap of 1.6 eV and was consistent with the literature. Firstly, bottom-gate device geometry on an ITO coated glass substrate was investigated. Gate dielectric and perovskite layers were formed by spin coating onto the ITO layer. Finally, aluminum source drain electrodes were formed by thermal evaporation. ITO layer was used as the gate electrode. SU8 and spin on glass in various thicknesses were used as gate dielectric. No gating behavior was observed in these devices therefore, 300 nm thick SiOx film was deposited on a silicon wafer in the Oxford PECVD system at Sabancı University SUNUM Laboratory. Perovskite film was coated on the SiOx film using the methods described above. Bottom-gate TFT devices were completed by deposition of silver source-drain electrodes via shadow mask method. Although gating behavior wasn't observed clearly in these devices, the leakage current problem was resolved in great extent. C_{60} was coated between silver electrodes and perovskite film to form ohmic contacts. Gating behavior was observed in devices employing C_{60} , and corresponding p and n type field-effect mobility values were calculated.

Key Words: perovskite, thin film transistors, display technology.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Savaş Berber'e,

Bütün çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan sevgili eşim Fatih DEĞİRMENCİ'ye ve maddi manevi desteklerini esirgemeyen Nuran DEĞİRMENCİ'ye,

TÜBİTAK Laboratuvar imkanlarını kullanıma açan TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü Müdür Yardımcısı Sayın Salih DABAK Bey'e

en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması TÜBİTAK BİDEB 2210-C bursu ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Bilgi ve İletişim Teknolojileri	1
1.2. Savunma	1
1.3. Sağlık	1
2. YARIİLETKENLER	3
2.1. Giriş	3
2.2. Perovskit	5
3. ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER	7
3.1. Giriş	7
3.1.1. Organik Alan Etkili Transistörlerin Tarihçesi	7
3.1.2. OFET'in Avantajları	7
3.1.3. OFET'in Genel Yapısı	8
3.1.4. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Bağlanması	9
3.1.5. OFET Operasyonu	11
4. ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLERDE PEROVSKİT YAPISI.	15
4.1. Perovskit Üretimi ve Karakterizasyonu	15
4.2. İnce Film Transistör Fabrikasyonu ve Ölçümleri	20
5. SONUÇ	31
KAYNAKLAR	32

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kısaltmalar

μ	: Mobilite
$C_{KAPİ}$	: Birim alandaki kapı kapasitansı
I_{SK}	: Kaynak savak arası akım
L	: Kanal uzunluğu
Q	: Levha yük yoğunluğu
$V_{EŞİK}$	: Eşik gerilimi
V_{KK}	: Kapı kaynak arasındaki gerilim
V_{KS}	: Savak kaynak arası gerilim
W	: Kanal genişliği

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: a) 1.2 milyon OFET ile sürülen elektroforetik mürekkep tabanlı esnek ekran, b) 3381 OFET'ten oluşan 8-bitlik esnek mikro kontrolcü entegre.	3
2.2: Organik- inorganik hibrit perovskit yapısı. Oktahedronun merkezinde sarı renkle gösterilem metal kayon, köşelerde ise pembe renk ile gösterilen halojen anyon bulunmaktadır. Organik katyon ise 8 adet oktahedron ile çevrilidir.	5
2.3: Perovskit'in yıllara göre artan verimliliği.	6
3.1: Üstten kapılı OFET konfigürasyonu.	8
3.2: Metal-yalıtkan-yarıiletken birleşmesinde enerji band diagramı.	9
3.3: Pozitif voltaj uygulanan dielektrik içindeki tuzak yüklerin hareketi.	10
3.4: n-kanal tipi OFET cihazı için operasyon bölgeleri.	11
3.5: Farklı operasyon bölgelerinde I_{SK} 'nın V_{SK} 'e bağlı değişimi.	12
3.6: OFET için transfer eğrisi. Eğrinin eğimi mobilite(μ) ile ilgilidir kesişimi, eşik voltajını ($V_{EŞİK}$) verir.	14
4.1: Profilometre ile ölçülen Perovskit film profili.	16
4.2: Perovskit filminin AFM görüntüsü ve yüzey pürüzlülüğü histogramı.	17
4.3: a) PbI_2 10000X, b) Perovskit 10000X, c) PbI_2 50000X, d) Perovskit 50000X büyütmede SEM görüntüleri.	17
4.4: Perovskit filminin optik absorbans grafiği.	19
4.5: PbI_2 ve perovskit filmlerinin XRD grafiği.	19
4.6: ITO kaplı cam üzerinde alttan kapılı ince film transistör üretim aşamaları, a) ITO aşındırma, b) Perovskit ve dielektrik katmanlarının kaplanması, c) Al savak kaynak elektrotlarının kaplanması..	20
4.7: İnce film transistör üretimi ve karakterizasyonunda kullanılan, a) Mbraun eldivenli kutu sistemi ve, b) Keithley 4200-SCS yarıiletke karakterizasyon sistemi.	20
4.8: I_{KS} ve I_{KS} 'nin V_{KK} 'ya göre değişimi. $V_{KAPİ}=V_{KAYNAK}=0$.	21
4.9: Kapı ve kaynak arasında Ortalama akımın ortalama Voltaja göre değ	22

4.10:	Savak ve kaynak arasında Ortalama akımın ortalama Voltaja göre değişimi.	22
4.11:	Silisyum yonga üzerinde üretilen alttan kapılı TFT cihazların şematiği.	23
4.12:	Savak ve kaynak elektrotları için kullanılan gölge maske.	24
4.13:	I_{KS} 'in V_{KK} 'ya göre değişimi. $V_{KS} = -40V$.	24
4.14:	Ohmik kontaklı TFT cihaz şematiği.	25
4.15:	I_{SK} 'nin V_{KK} 'a göre değişimi. $V_{SK} = 30 V$.	26
4.16:	I_{SK} 'nin V_{KK} 'a göre değişimi. $V_{SK} = -30 V$.	26
4.17:	I_{SK} 'nın V_{KK} 'a göre değişimi $V_{KK} = 0 V$.	28
4.18:	I_{SK} 'nın V_{KS} 'e göre değişimi. $V_{KK} = -10 V$.	28
4.19:	Silisyum yonga üzerine büyütölen SiNx filmi.	30

1. GİRİŞ

Perovskit tabanlı ambipolar TFT'lerin geniş alanlı esnek CMOS devre uygulamalarında kullanılması mümkündür. Bu tip devrelerin kullanım alanları ise ekran teknolojileri, muharebe sistemleri ve biyo-uyumlu tanı sistemleri gibi geniş bir uygulama yelpazesini içermektedir.

1.1. Bilgi ve İletişim Teknolojileri

Geniş alanlı esnek devrelerin en önemli uygulama alanlarından biri ekran teknolojileridir. Ekran teknolojilerinde ekseriyetle kullanılan a-Si, poli-Si ve metal-oksit malzemeler vakum sistemi gerektirdiğinden ekran boyutunun artması ile maliyet doğru orantılı olarak artmaktadır. R2R prosesler ile uyumlu ve yüksek performanslı TFT'ler, geniş alanlı esnek ekran üretiminde maliyeti büyük oranda düşürme potansiyeline sahiptir.

1.2. Savunma

Esnek devrelerin en önemli uygulama alanlarından biri giyilebilir elektronığın savunma sanayiine uygulanmasıdır. Piyadenin ağır ekipmanı, üniformaya entegre edilmiş giyilebilen hafif sistemler ile değiştirilerek piyadenin hareket kabiliyeti artırılabilir. Giyilebilir elektronik malzemeler arasında haberleşme ekipmanları, piyadenin hayati fonksiyonlarını takip eden sensörler, güneş paneli ve batarya sistemleri sayılabilir.

1.3. Sağlık

Erken müdahale, kalp krizi ve felç gibi durumların vücuda bırakacağı kalıcı hasarları önlemekte en önemli yoldur. Deri altına monte edilebilen biyo-uyumlu esnek devreler ile vücut fonksiyonlarını (kalp aritmis, vs.) an be an kontrol edip acil durumlarda en yakın sağlık merkezine uyarı göndermek mümkündür. Bu durum özellikle yalnız yaşayan yaşlı ve riskli hastalar için daha büyük önem arz etmektedir.

Benzer teknolojiler aynı zamanda yapay duyu organı ve yapay protez teknolojilerinde de kullanılmaktadır.

2. YARIİLETKENLER

2.1. Giriş

Alan etkili organik transistörler (OFET) üzerine son 25 yıldır yapılan araştırmalar, küçük molekül ve konjüge polimer fiziği hakkındaki temel bilgilerimizin hızlı bir şekilde artmasına sebep olmuştur. Bu bilgi birikimi sonucu geliştirilen organik yarı iletken malzemeler; organik güneş pilleri (OPV) ve ışık yayan organik diyotların (OLED) iyileştirilmesine de olanak sağlamıştır. Alan etkili mobilite değerleri 25 yıl içerisinde $10^{-3} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ gibi basit değerlerden $1\text{-}10 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ aralığındaki değerlere yükselerek a-Si TFT'lerin seviyesini yakalamıştır.

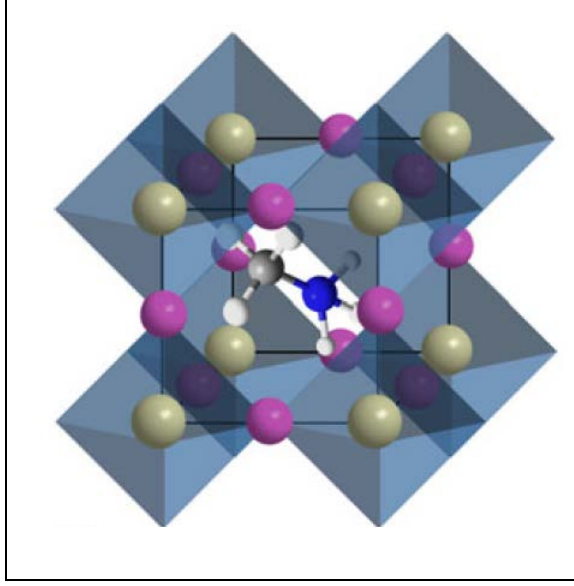


Şekil 2.1: a) 1.2 milyon OFET ile sürülen elektroforetik mürekkep tabanlı esnek ekran, b) 3381 OFET'ten oluşan 8-bitlik esnek mikro kontrolcü entegre.

Malzeme performansındaki gelişmeler, Şekil 2.1'de görülen elektroforetik mürekkep tabanlı yüksek çözünürlüklü esnek ekranlar ve 8-bitlik entegre devreler gibi etkileyici uygulamalara olanak sağlamıştır [1]. Aynı dönemde endüstriyel üretim

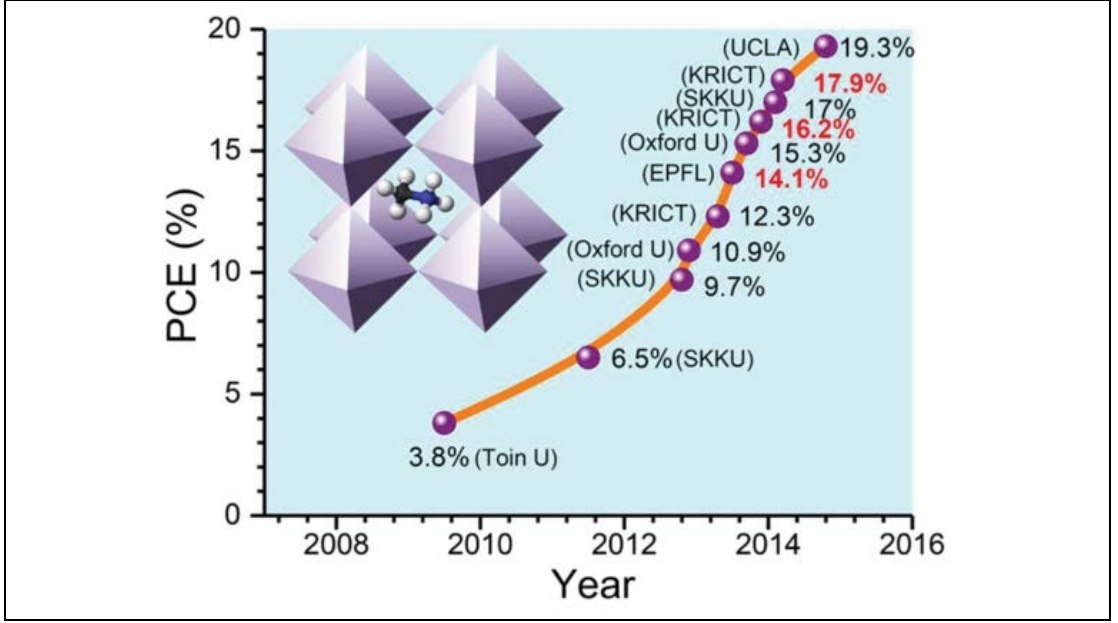
teknolojilerinde de önemli gelişmeler yaşanmıştır. Plastic Logic gibi şirketler OFET teknolojisini ilerleterek LCD endüstrisinin a-Si teknolojisinde yakaladığı yüksek performans, kararlılık ve verim değerlerinin OFET teknolojisinde de endüstriyel seviyede yakalanabileceğini göstermiştir. OFET tabanlı esnek ekranlar yavaş yavaş pazardaki yerini almaya başlamıştır. Halihazırdaki performansı ile OFET teknolojisi e-gazete, basit devreler, kimyasal ve biyolojik sensörler gibi pek çok alanda uygulanabilirliğini ispatlamıştır [1], [2]. Malzeme ve üretim teknolojilerindeki gelişmeler sonucunda OFET teknolojisinin daha yüksek performans gerektiren alanlara da uygulanabilirliği sorusu merak konusudur. Bu tip uygulama alanlarının en önemlilerinden birisi video görüntüleme hızında çalışabilen tam-renkli esnek OLED ekranlardır. OLED ekranlar akıllı telefon ve diğer küçük ekran uygulamalarında LCD teknolojisinin yerini almaktadır. Yakında tablet ve televizyon gibi orta ve büyük ekran pazarını da domine etmesi beklenmektedir. OLED ekranların arka panelinde yer alan sürücü devrelerdeki performans isterleri a-Si TFT'ler için çok yüksek olduğundan bu alanda genellikle poli-Si TFT'ler kullanılmaktadır. Poli-Si TFT'lerde homojenlik problemi olduğundan son yıllarda oksit TFT'lere olan ilgi artmıştır ve yakında bu teknolojinin de ticarileşmesi beklenmektedir [3]. Her iki teknolojiye de alan etkili mobilite değerleri $50 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 'den daha büyüktür. Pek çok ekran üreticisi hafif, darbeye dayanıklı ve çeşitli yüzeylere uygulanabilir olması nedeniyle yakın gelecekte esnek ekran üretimine geçmeyi amaçlamaktadır. OLED ve OFET in malzeme uyumluluğundan dolayı OFET teknolojisi OLED ekranların arka paneli için prensipte en ideal teknolojidir. İnorganik malzemelere oranla mekanik açıdan çok daha dayanıklı olması sebebiyle 100 μm civarında eğrilik yarıçapına sahip yüzeylere bile uygulanabilmektedir [4]. OFET tarafından sürülen OLED prototipleri pek çok grup tarafından gösterilmiştir fakat yine de poli-Si ve oksit teknolojilerinde yakalanmış olan performans, kararlılık ve cihaz ömrü gibi değerlerin OFET teknolojisi tarafından karşılanabileceğine şüphe ile bakılmaktadır [5]-[7].

2.2. Perovskit



Şekil 2.2: Organik- inorganik hibrit perovskit yapısı. Oktahedronun merkezinde sarı renkle gösterilem metal kayon, köşelerde ise pembe renk ile gösterilen halojen anyon bulunmaktadır. Organik katyon ise 8 adet oktahedron ile çevrilidir.

Hibrit perovskit teknolojisi organik malzemelerin düşük sıcaklıklı ve düşük maliyetli proses metodu ile inorganik malzemelerin performans özelliklerini birleştirdiğinden ekran teknolojisi adına yeni bir potansiyel oluşturabilir. Perovskit malzemeler genel olarak ABX_3 yapısında olup Şekil 2.2’de görüldüğü üzere B katyonu BX_6 oktahedronunun merkezinde, X anyonları ise köşelerinde yer alır [8]. A katyonu ise 8 adet bu tip oktahedron ile çevrilidir. Perovskit ailesinin en yeni üyesi olan organik-inorganik hibrit perovskitler, organik ve inorganik malzemelerin çeşitli avantajlarını birleştirdiklerinden ilgi odağı haline gelmişlerdir [9], [10]. Özellikle A’nın organik katyon, X’in ise halojen olduğu kurşun içeren perovskitler (A^+PbX_3) potansiyel çevresel zararlarına rağmen yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Örneğin hibrit perovskit tabanlı fotovoltaiik güneş hücrelerinin verimi (PCE) günümüzde %20’yi aşmış bulunmaktadır [11]. Yine benzer malzemenin kullanıldığı ışık yayan diyotların performansı ticari ürünlerle boy ölçüşebilmektedir [12].



Şekil 2.3: Perovskit güneş pillerinin yıllara göre artan verimliliği.

Şekil 2.3'te görüldüğü üzere perovskit güneş pillerinin verimliliği %3.8'den %19.3'e kadar çıkmıştır [13]. Bu da malzeme performansının artırılabilceği yönünde umut vaat etmektedir. Şu anki kullanım oranına bakılarak dünyadaki fosil enerji kaynaklarının yaklaşık 50 yıl içerisinde çok büyük oranda azalacağı öngörülmektedir. Bu sebeplerden dolayı güneş pillerinin ince film yapılarında kullanılan perovskit gibi malzemelerin bu derece performans sağlaması bilim insanlarını heyecanlandırmış ve bu gibi konular üzerinde çalışma eğilimini artırmıştır.

Metil amonyum ($A^+=CH_3NH_3^+$) tabanlı hibrit perovskitler daha çok çalışılmakla birlikte etil amonyum $CH_3CH_2NH_3^+$ ve formamidinyum $NH_2CH=NH_2^+$ gibi diğer organik katyonlar da araştırılmaktadır [14], [15]. Anyon çeşidinin ($X = I, Br, Cl$) kristal kalitesi, bant aralığı, fotovoltajik verim ve eksiton bağlanma enerjisi gibi pek çok fiziksel parametreyi etkilediği gözlemlenmiştir [16]-[19].

3. ORGANİK ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER

3.1. Giriş

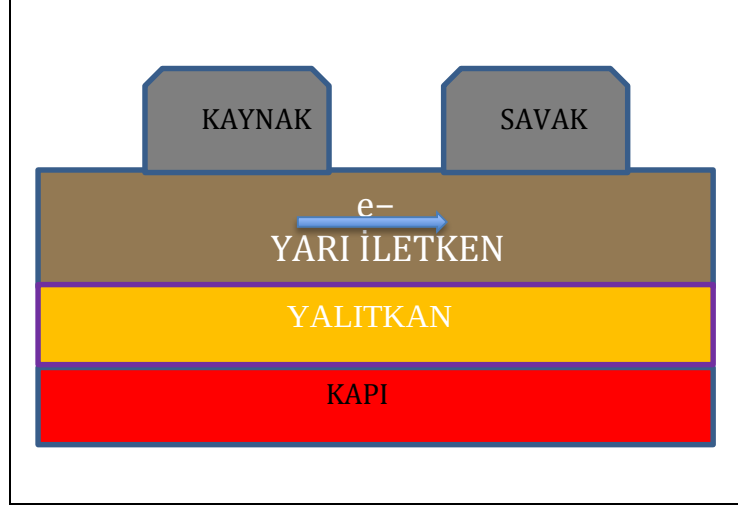
3.1.1. Organik Alan Etkili Transistörlerin Tarihçesi

Organik yarı iletkenleri kullanan ilk metal-okisit-yarıiletken kapasitör Ebisawa, Kurokawa ve Nara tarafından 1982'de NTT'de gösterilmiştir. Cihaz, poli-siloksan kapı dielektriği üzerinde yarıiletken olarak poli-asetilen kullanılarak üretilmiş ve kaynak-savak elektrotları için altın kapı elektrotu için ise alüminyum kullanılmıştır. Bir sonraki önemli kilometre taşı, 1986 yılında Mitsubishi Chemical'da Tsumura, Koezuka ve Ando tarafından polimerize edilen polietilen ile kaydadeğer bir akım kazancına sahip ilk organik alan etkili transistörün (OFET) geliştirilmesidir. 1986'da Tang tarafından organik heteroeklemlili güneş pilinin (OPV) ve 1987'de Tang ve Van Slyke tarafından organik ışık yayan diyotun bulunmasının ardından, organik yarı iletkenlere olan ilgi büyük oranda artmaya başlamıştır. 1988'de Jen ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilen, çözünür bir politiyofen türevi, Assadi ve çalışma arkadaşları tarafından OFET'lere uygulanmıştır. Matbaa ölçeğinde yazdırılabilecek çözeltiden işlenebilir yarıiletken sistemlerin imkan dahiline girmesi akademik dünyada heyecan uyandırmıştır.

3.1.2. OFET'in Avantajları

OFET'in en önemli avantajları arasında, esnek yüzeylere uyumluluk, düşük işlem sıcaklığı, düşük maliyet, yüksek hızlı imalat ve ayarlanabilir elektronik özellikler sıralanabilir. Bu özellikler, düşük güç tüketimli esnek ekranlar, düşük maliyetli radyo frekans tanımlama (RFID) etiketleri, basılabilir sensörler gibi birçok yeni nesil elektronik ürün uygulaması için temel oluşturmaktadır. Halen p-kanal (hole-transfer) materyalleri organik yarıiletkenler sınıfında öncüdür. Buna karşın, yüksek performanslı n-kanal (elektron-transfer) yarıiletkenler nispeten nadir bulunur fakat OFET gibi plastik elektronik cihazların geliştirilmesinde büyük önem taşımaktadır.

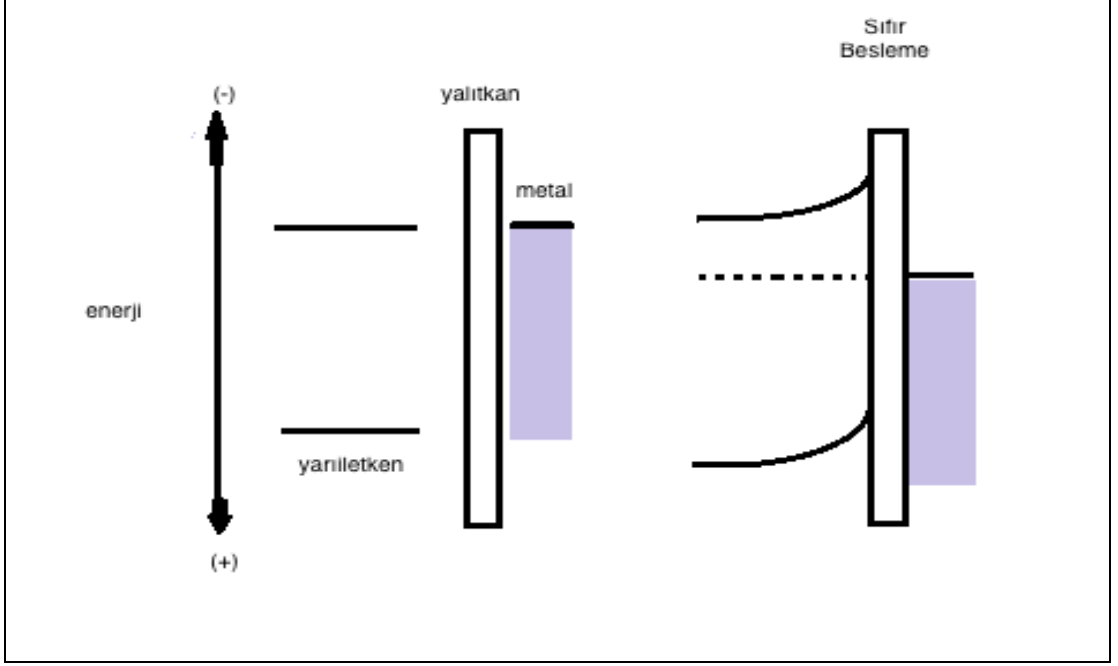
3.1.3. OFET'in Genel Yapısı



Şekil 3.1: Üstten kapılı OFET konfigürasyonu.

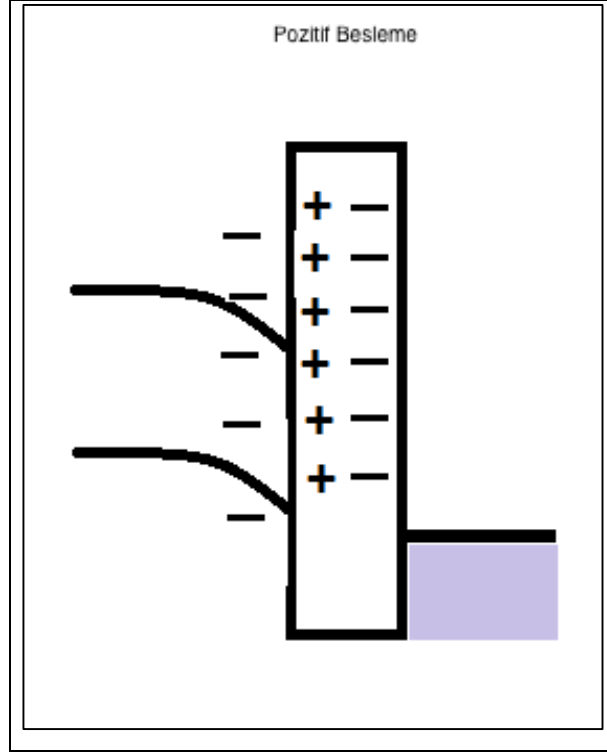
Geleneksel OFET'de, yük taşıyıcıları kanaldaki dielektrik yüzeyine paralel olarak ilerlemektedir. Kaynak ve savak elektrotları kanala erişim sağlar ve tüm besleme durumlarında kanala yük enjekte edecek şekilde tasarlanmışlardır. Cihazda iletkenliğin ayarlanabildiği kısım kanal, yani kaynak ve savak arasında kalan aralıktır. Kanalın iletkenliğinin ayarlanabilmesi cihazın anahtarlama özeliği göstermesini sağlar. Kapı, kapı dielektriği vasıtasıyla kanaldan ayrılır ve bu üç tabaka beraber bir kapasitör yapısı oluştururlar. Kapı dielektriği, yarı iletken üzerinde bir elektrik alan yaratılmasına ve DC akıma ihtiyaç duymadan taşıyıcıların birikmesi ve tükenmesine olanak tanır.

3.1.4. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Bağlanması



Şekil 3.2: Metal-yalıtkan-yarıiletken birleşmesinde enerji band diagramı.

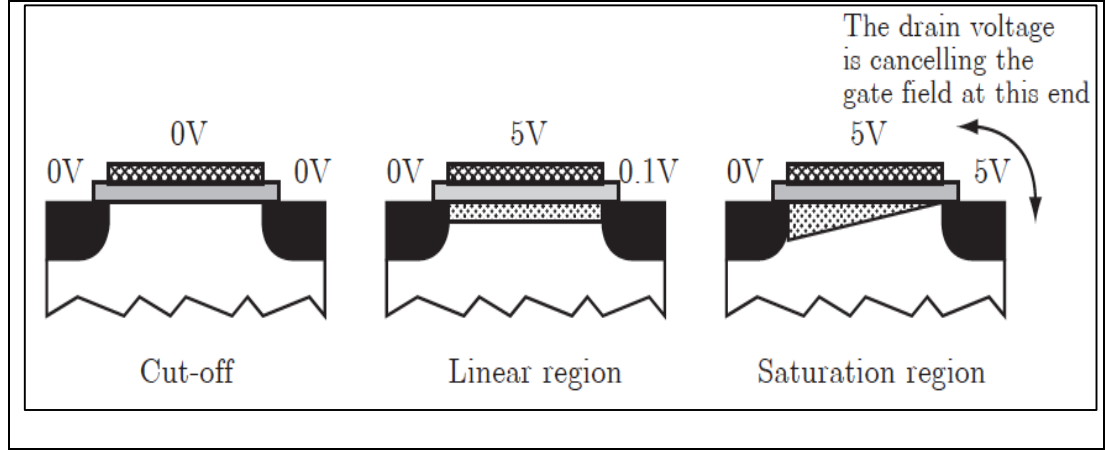
Bir metal-yalıtkan-yarı iletken eklemünde, sıfır besleme varsa, yarıiletken ve metalin Fermi düzeyindeki enerji farkından dolayı elektronlar yüzeyden dışlanır. Bu yarıiletkende bant bükülmesine yol açar. Bu durumda kaynak ve savak arasında taşıyıcı hareketi yoktur. Pozitif yük uygulandığında, ara yüz üzerindeki elektron birikimi, yarı iletkenin zıt bir şekilde bükülmesine yol açar ve iletken bandın yarıiletkenin Fermi seviyesine göre daha aşağı bükülmesine neden olur. (Şekil 3.3) Ardından ara yüzde oldukça iletken bir kanal oluşur.



Şekil 3.3: Pozitif voltaj uygulanan dielektrik içindeki tuzak yüklerin hareketi.

Kapı meteline gerilim uygulandığında, bandın bükülmesi dielektrik katmanındaki tuzak yüklerden dolayı aniden başlamaz. Pozitif gerilim, pozitif tuzak yüklerini ters yönde iterken negatif tuzak yüklerini kapı meteline doğru çeker. Dielektriğin farklı taraflarında pozitif ve negatif tuzak yüklerinin oluşması, kapı beslemesine ters yönde etki eden bir elektrik alan ve gerilime neden olur. Bant eğilmesi ancak, uygulanan kapı voltajının, tuzaklar tarafından oluşturulan gerilimi yenmesinden sonra başlar. Belirli bir noktada bant düzleşir ve zıt yönde bükülmeye başlar, bu da yüzey üzerinde negatif yüklerin birikmesine ve dolayısıyla kanal oluşumuna neden olur. Tuzak yükler tarafından yaratılan gerilimin üstesinden gelme ve bandı düz hale getirmek için gereken toplam voltaja eşik voltaj denir, $V_{EŞİK}$.

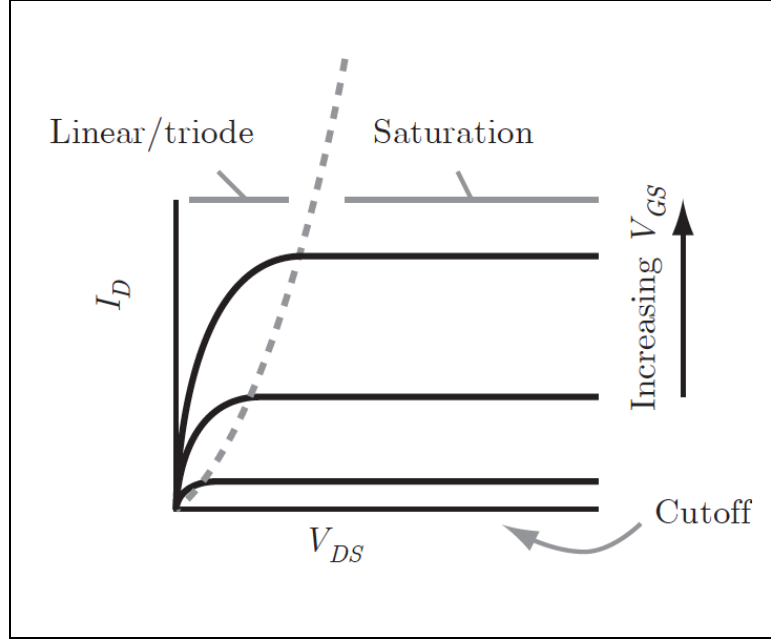
3.1.5. OFET Operasyonu



Şekil 3.4: n-kanal tipi OFET cihazı için operasyon bölgeleri.

Üç tip OFET operasyon modeli vardır. Bunlar, cut-off, lineer bölge, doyum bölgesi'dir. Temel kapı kapasitör yapısı Şekil 3.4'te verilmiştir [20]. OFET'ler, bağlantılarının kanala elektriksel erişimi iyi olacak şekilde tasarlanır. Kanal, kapı kapasitörü tarafından tüketildiğinde ($V_{KK} < V_{EŞİK}$) kanalda daha az hareketli yük ve daha az akım vardır. Kanal biriktiğinde ($V_{KK} > V_{EŞİK}$), daha fazla yük ve iletkenlik vardır. Kapı-savak voltajının (V_{SK}) eşik voltajını geçmesi ve küçük olması durumunda her iki taraf yaklaşık aynı Q yükü kadar evrilir ve cihaz direnç gibi davranır. Büyük V_{SK} uygulandığında, kapı tarafından uygulanan elektrik alan savak tarafında kısmen savak tarafında yok edilir. Savaktaki potansiyel, esik voltajının altına düştüğünde $Q \sim 0$ olur ve akımı telafi edebilmek için yük taşıyıcı hızı artar. Bu da pinch off'a ve transistör karakteristiğinde gözlemlenen doyuma sebep olur. Taşıyıcıların hepsi fiziksel olarak kapı dielektrik ara yüzüne çok yakın konumdadır. Şekil 3.4'teki üçgen, taşıyıcı yoğunluğunun kanal boyunca sabit olmadığını göstermektedir. Kanal boyunca akım sabit olduğundan, doyum bölgesinde kanal boyunca yük taşıyıcı hızı yanal elektrik alan homojen değildir.

$V_{SK} \ll V_{KK} - V_{EŞİK}$ olduğunda, kanal akımı, I_{SK} , V_{KK} 'ye lineer olarak bağlıdır (Lineer bölge). Pinch-off'a erişildiğinde ise, kanal akımı artık artmaz ve bu nedenle I_{SK} (doygunluk bölgesi) Şekil 3.5'te görüldüğü gibi doyuma ulaşır [20].



Şekil 3.5: Farklı operasyon bölgelerinde I_{SK} 'nın V_{SK} 'e bağlı değişimi.

I_{SK} 'nin farklı operasyon bölgelerinde türetilmesi aşağıdaki gibidir:

$I_{SK}=0 \rightarrow$ Bu, Şekil 3.5'te görülen cut-off bölgesi için geçerlidir [20].

$$I_{SK} = \frac{Q_{TOP}}{\Delta t} \quad (3.1)$$

$$\Delta t = \frac{L}{v} \quad (3.2)$$

$$v = \mu \cdot E \quad (3.3)$$

$$E = \frac{V_{SK}}{L} \quad (3.4)$$

$$I_{SK} = Q_{TOP}/\Delta t = Q_{TOP} \cdot v/L = Q_{TOP} \cdot (\mu \cdot V_{SK}/L)/L = \frac{Q_{TOP} \cdot \mu \cdot V_{SK}}{L^2} \quad (3.5)$$

$$Q_{TOP} = C_{TOP} \cdot V_{KAPASİTÖR} \quad (3.6)$$

$$C_{TOP} = \epsilon \cdot A/d \quad (3.7)$$

$$C_{KAPI} = \frac{\varepsilon}{d} \quad (3.8)$$

$$C_{TOP} = C_{KAPI} \cdot W \cdot L \quad (A=W.L.) \quad (3.9)$$

$$V_{KAPASİTÖR} = \left(V_{KAPI} - V_{EŞİK} - \frac{(V_{SAVAK} + V_{KAYNAK})}{2} \right) \quad (3.10)$$

$$V_{KK} = V_{KAPI} - V_{KAYNAK} \quad (3.11)$$

$$V_{SK} = V_{SAVAK} - V_{KAYNAK} \quad (3.12)$$

$$V_{KAPASİTÖR} = V_{KK} + V_{KAYNAK} - V_{EŞİK} - \frac{(V_{SK} + V_{KAYNAK} + V_{KAYNAK})}{2} \quad (3.13)$$

Böylece,

$$V_{KAPASİTÖR} = V_{KK} - V_{EŞİK} - \frac{V_{SK}}{2} \quad (3.14)$$

Dolayısıyla, Q_{TOP} ve I_{SK} 'i tekrar şu şekilde yazabiliriz,

$$Q_{TOP} = C_{KAPI} \cdot W \cdot L \cdot \left(V_{KK} - V_{EŞİK} - \frac{V_{SK}}{2} \right) \quad (3.15)$$

$$I_{SK} = \frac{\mu \cdot C_{KAPI} \cdot W \cdot L \cdot V_{SK} \cdot \left(V_{KK} - V_{EŞİK} - \frac{V_{SK}}{2} \right)}{L^2} \quad (3.16)$$

Sonuç olarak,

$$I_{SK} = \mu \cdot C_{KAPI} \cdot \left(\frac{W}{L} \right) \cdot \left(V_{KK} - V_{EŞİK} - \frac{V_{SK}}{2} \right) \cdot V_{SK} \quad (3.17)$$

Bu eşitlik lineer bölge için geçerlidir.

pinch-off ' da ise durum;

$$V_{SK} = V_{KK} - V_{Eşik} \quad (3.18)$$

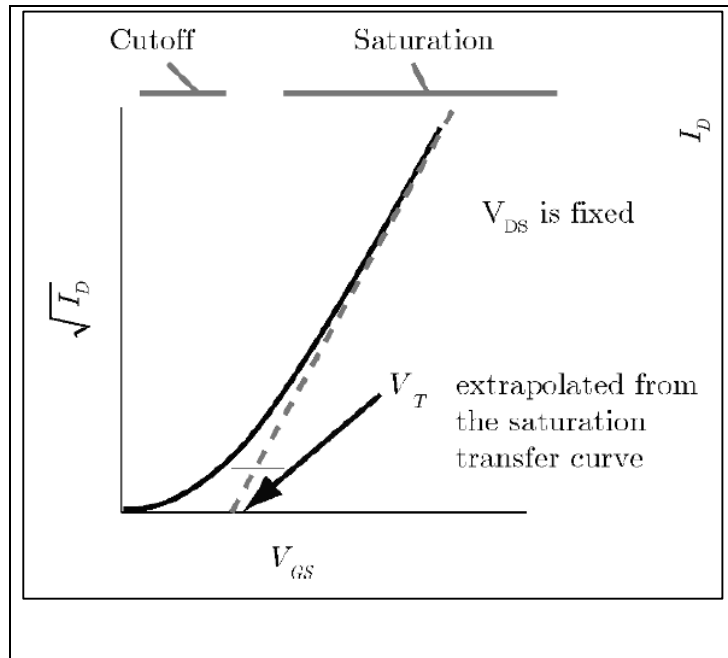
Bu eşitlikten dolayı doyumda I_{SK} ,

$$I_{SK} = \mu \cdot C_{KAPI} \cdot \left(\frac{W}{L}\right) \cdot \frac{(V_{KK} - V_{Eşik})^2}{2} \quad (3.19)$$

Eğer eşitliğin her iki tarafından karekök alırsak, aşağıdaki eşitliği görebiliriz.

$$\sqrt{\frac{I_{SK}}{(V_{KK} - V_{Eşik})}} \sim \sqrt{\frac{\mu \cdot C_{KAPI} \cdot W}{2L}} \quad (3.20)$$

Bu eşitliğe göre, $\sqrt{I_{SAVAK}} \sim V_{KK}$ eğimi mobilite ile bağıntılıdır. Eşik voltaj, doygunluk transfer eğrisinin x eksenini kestiği noktaya bakılarak bulunur [20].



Şekil 3.6: OFET için transfer eğrisi.

4. ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLERDE PEROVSKİT YAPISI

4.1. Perovskit Üretimi ve Karakterizasyonu

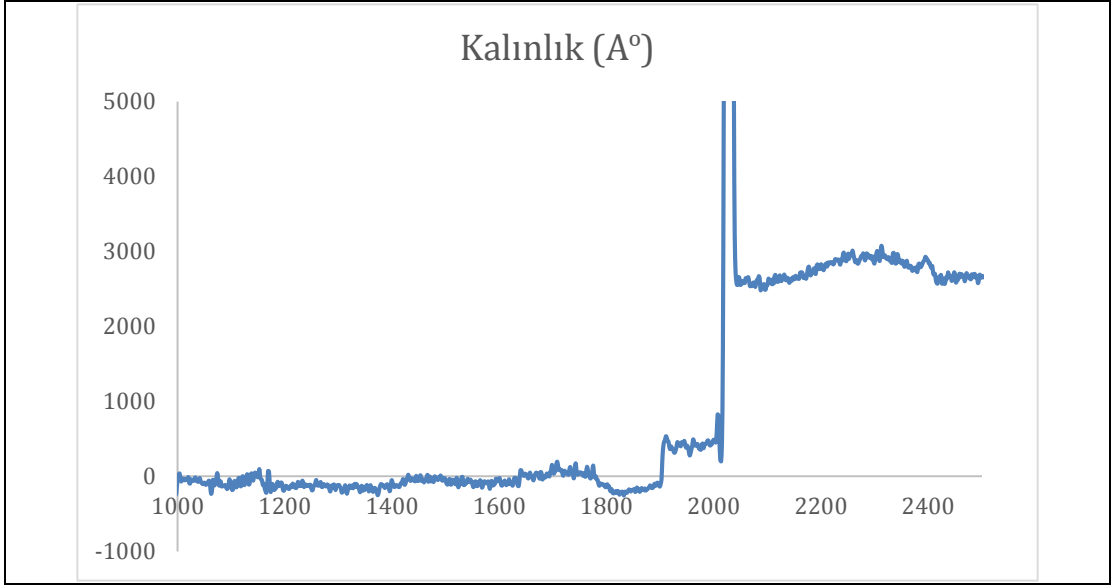
Perovskit film üretiminde literatürde sıralı kaplama olarak geçen bir metot kullanıldı [21]. Bu yöntemde öncelikle alttaş üzerine PbI_2 filmi kaplanır. PbI_2 filmi üzerine MAI solüsyonu dönel kaplama metodu ile uygulanır. Dönel kaplama esnasında MAI, PbI_2 filmi içine difüz ederek $CH_3NH_3PbI_3$ oluşumunu başlatır. Reaksiyona girmeyen MAI tavlama ile uzaklaştırılarak perovskit film oluşumu tamamlanır.

PbI_2 N,N-dimetilformamid (DMF) içinde çözülerek 250 mg/ml'lik çözelti hazırlanır. Benzer şekilde MAI isopropil alkol (IPA) içinde çözülerek 10 mg/ml'lik çözelti hazırlanır. Çözeltiler dönel ısıtıcı üzerinde bekletilerek PbI_2 ve MAI'nin tamamen çözünmesi sağlanır. PbI_2 solüsyonu cam alttaş üzerine 3000 rpm'de 20 saniye dönel kaplama ile kaplandıktan sonra ısıtıcı üzerinde 70 C°'te 5 dakika bekletilir. MAI çözeltisi PbI_2 filmi üzerine damlatıldıktan sonra 20 saniye beklenir ve daha sonra sırayla 2000 rpm ve 5000 rpm'de 20'şer saniye dönel kaplamaya tabi tutulur. Reaksiyona girmeyen MAI'nin uzaklaştırılması için filmler 110 C°'te 60 dakika tavlama tabi tutulur.

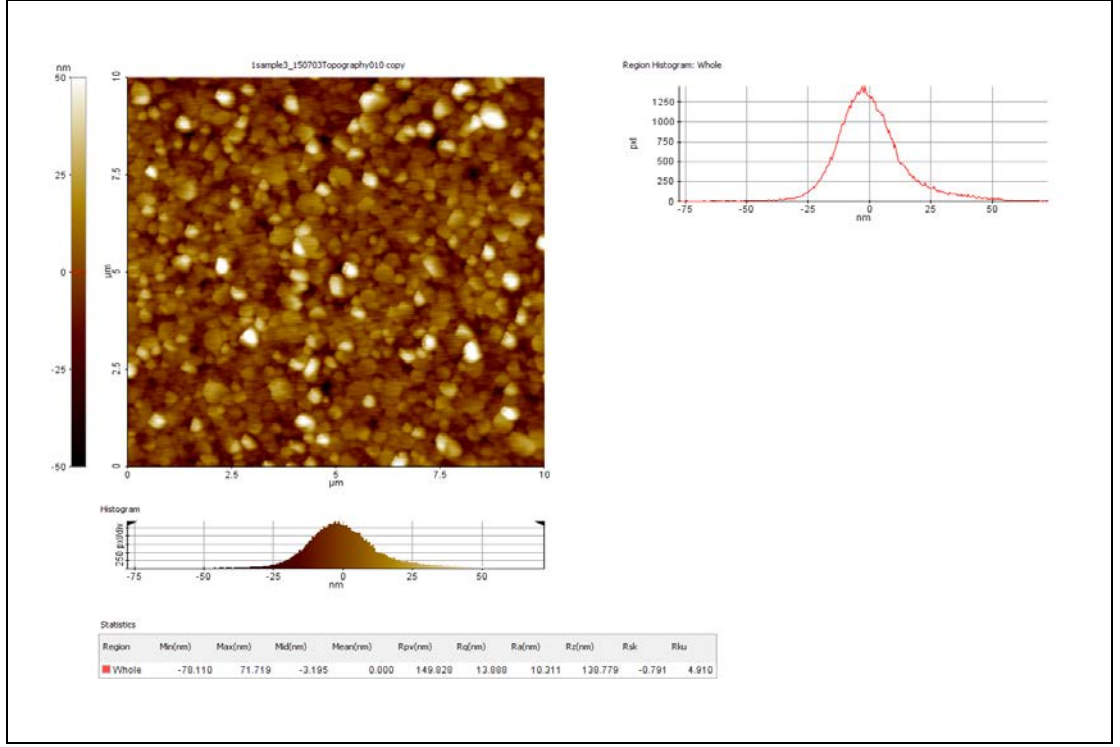
Bu yöntem ile üretilen PbI_2 filmlerinin karakterizasyonu TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü ve Medeniyet Üniversitesi Laboratuvarlarında gerçekleştirildi. Film kalınlığı ölçümlerinde Ambios XP-200 profilometre kullanıldı. Yüzey profili ve pürüzlülük ölçümlerinde TÜBİTAK MAM Fotonik Teknolojiler Laboratuvarındaki ParkSystems XE-100E model Atomik Kuvvet mikroskobu (AFM) kullanıldı. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri TÜBİTAK Malzeme Enstitüsü'ndeki JEOL 6510-LV JSM sisteminde gerçekleştirildi. UV absorbans ve XRD verileri Medeniyet Üniversitesi Fizik Bölümü laboratuvarındaki sistemlerde toplandı. Absorbans ölçümlerinde Shimadzu UV-2600 UV-Vis spektrofotometre, X-ray dağılım ölçümlerinde ise bakır K- α hedefi içeren Bruker D8 Discover X-ray difraktometre sistemi kullanıldı.

Profilometre ile yapılan ölçümlerde film kalınlığının yaklaşık 290 nm olduğu görüldü. Sıralı kaplama yöntemi ile elde edilen filmlerin tek çözeltiden kaplama yöntemi ile elde edilen filmlere göre daha pürüzsüz olduğu ve daha az iğne deliği

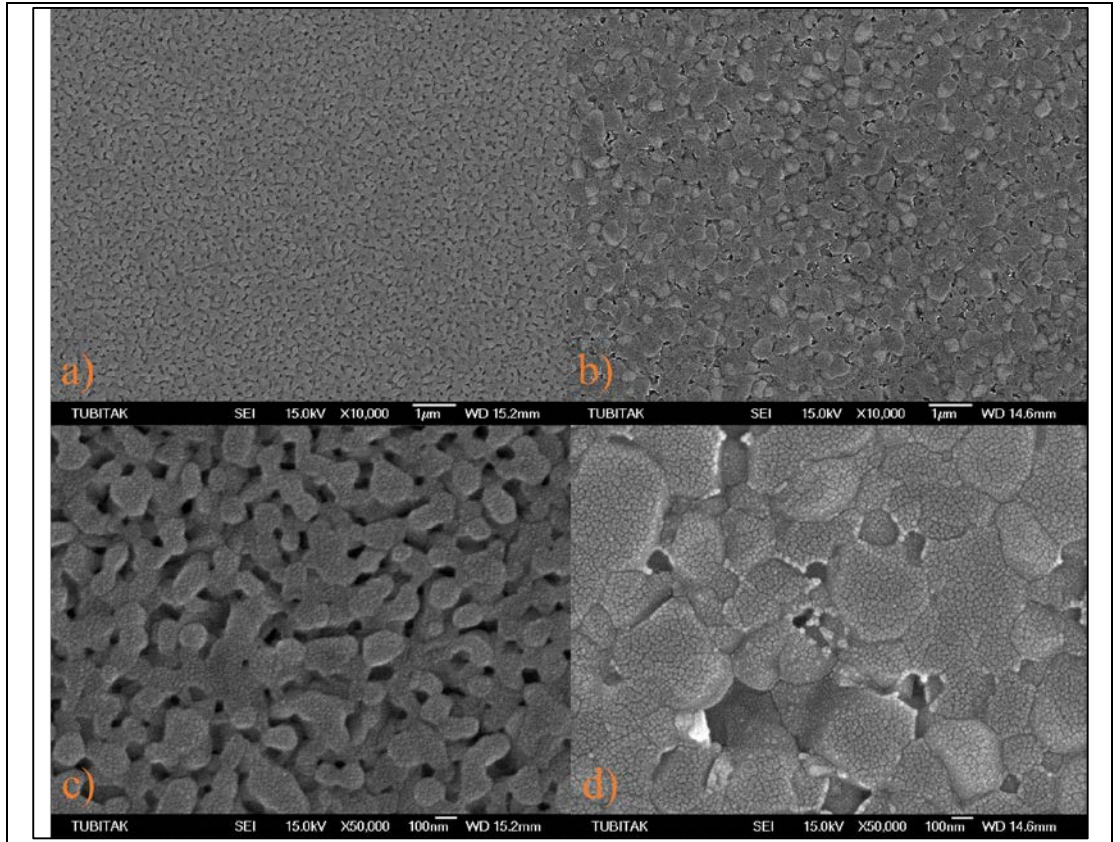
içerdiği literatürde belirtilmektedir. Yapılan AFM ölçümlerinde sadece 13.9 nm (rms) pürüzlülük gözlemlenerek bu görüş doğrulanmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde perovskit filminin tanecik boyutunun PbI_2 filmine göre daha büyük olduğu görülmektedir. Aynı zamanda perovskit filmindeki iğne deliği sayısının PbI_2 filmine nazaran çok daha az olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4.1: Profilometre ile ölçülen Perovskit film profili.

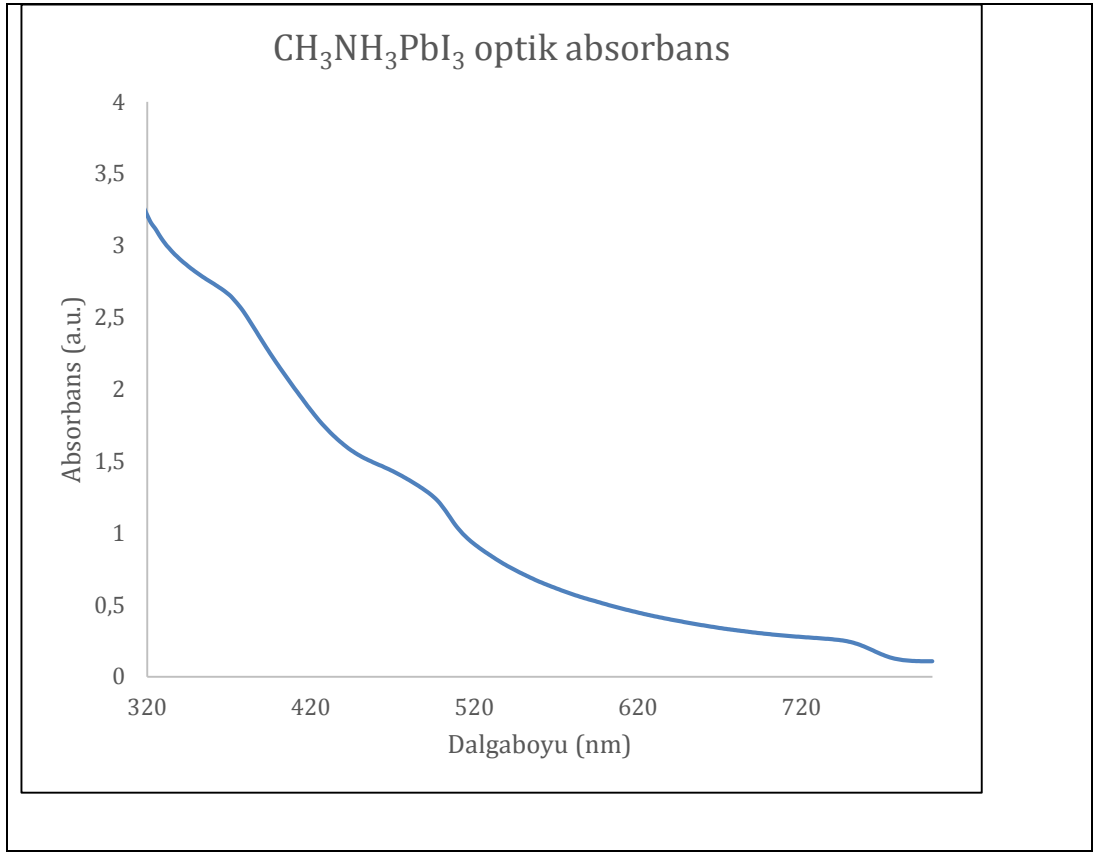


Şekil 4.2: Perovskit filminin AFM görüntüsü ve yüzey pürüzlülüğü histogramı.

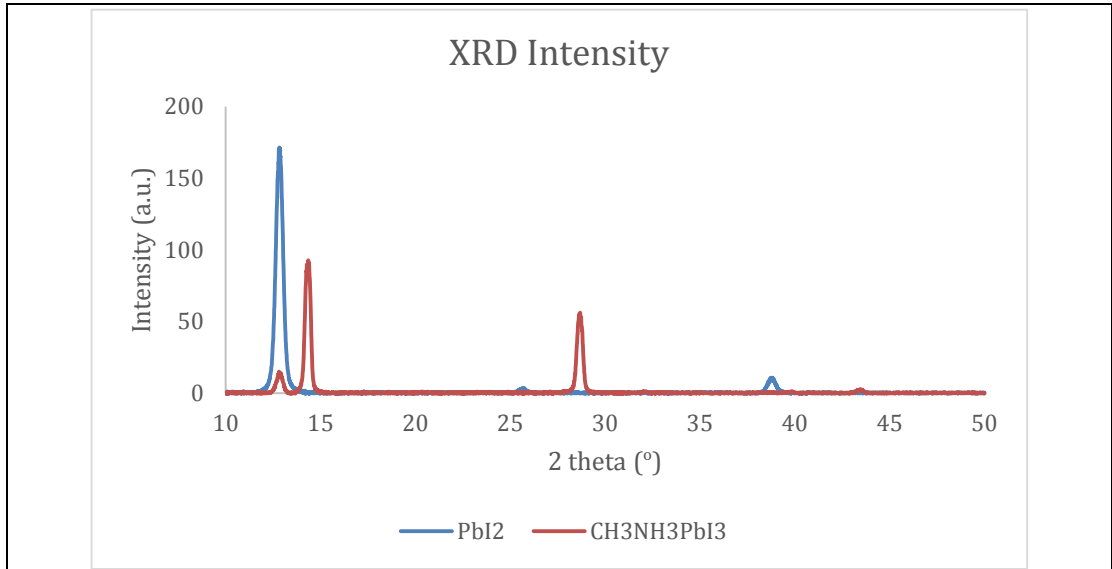


Şekil 4.3: a) PbI_2 10000X, b) Perovskit 10000X, c) PbI_2 50000X, d) Perovskit 50000X büyütmede SEM görüntüleri.

Perovskit filminin optik absorbands datası Şekil 4.4'te verildi. Absorbans datasının literatürdeki $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ absorbands datası ile uyumlu olduğu görüldü [22]-[23]. Perovskit filminin absorbands başlangıcının yaklaşık 1.6 eV'lik bir bant aralığına tekabül ettiği ve literatür ile uyumlu olduğu görüldü [21]. Yaklaşık olarak 750 nm ve 500 nm'deki absorbands tepelerinin varlığı perovskit kristal oluşumunu desteklemektedir. Literatürdeki PbI_2 optik absorbands profili $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 'den elde edilen optik absorbands profilinden çok daha farklı olduğundan MAI difüzyonu sonucu PbI_2 filminin büyük oranda perovskit dönüştüğü iddia edilebilir. $\text{PbI}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ dönüşümünü daha detaylı incelemek için XRD tekniğine başvuruldu. PbI_2 filmi için ana kırınım tepesi, literatüre benzer biçimde 12.8° derecede ikincil ve üçüncül tepeler ise 25.6° ve 38.8° derecede tespit edildi. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ filmi içinse kırınım tepeleri 14.3° , 28.6° ve 43.3° derecede görüldü. Bu tepeler sırasıyla perovskit kristalinin (110), (220) ve (330) düzlemlerine karşılık gelmektedir. Fakat perovskit filminde de 12.8° derecede küçük bir tepecik görülmektedir ki bu da perovskit filmi içinde hala PbI_2 varlığına işaret etmekte ve $\text{PbI}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ dönüşümünün yüzde yüz tamamlanmadığını göstermektedir. Bu dönüşümdeki verimin artırılması için 2 aşamalı perovskit üretim tekniğimizdeki parametrelerin daha da optimize edilmesi gerekmektedir.



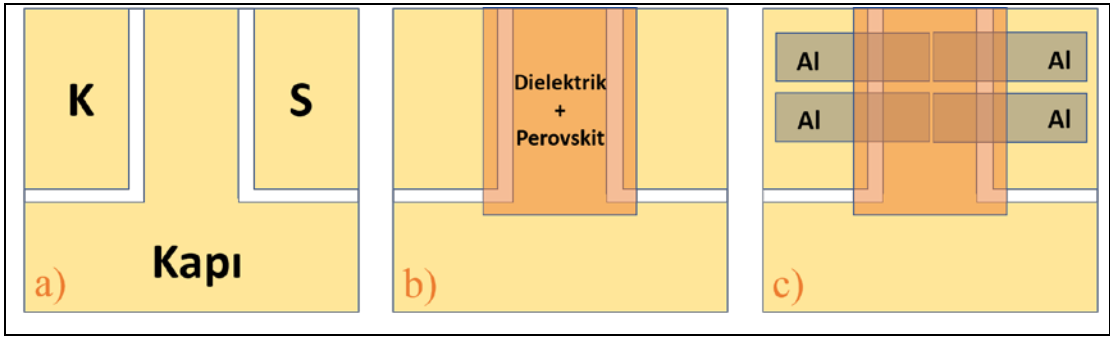
Şekil 4.4: Perovskit filminin optik absorbans grafiği.



Şekil 4.5: PbI_2 ve perovskit filmlerinin XRD grafiği.

4.2. İnce Film Transistör Fabrikasyonu ve Ölçümleri

Öncelikle ITO kaplı cam alttaş üzerinde alttan kapılı cihaz geometrisi üzerine çalışıldı. ITO tabakası Şekil 4.6.a)'da görüldüğü üzere seçici olarak aşındırılarak savak kaynak kapı bölgeleri birbirinden izole edildi. Aşındırma esnasında Çinko katalist ve %20 HCl çözeltisi kullanıldı. ITO tabakası üzerine kapı dielektriği ve perovskit tabakası dönele kaplanarak Şekil 4.6.b)'deki gibi şekillendirildi. Son olarak termal buharlaştırma metodu ile Alüminyum savak kaynak elektrotları oluşturuldu. Bu aşamada TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü bünyesinde bulunan MBraun eldivenli kutu sistemine entegre bir termal buharlaştırma sisteminden faydalanıldı. Kapı elektrotu olarak ise ITO tabakası kullanıldı.

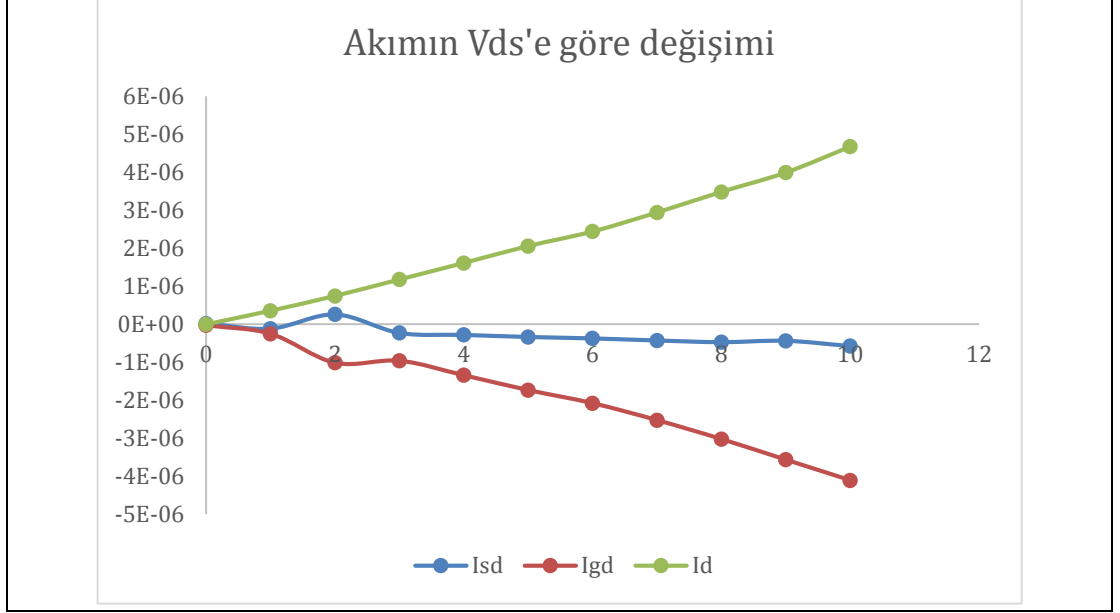


Şekil 4.6: ITO kaplı cam üzerinde alttan kapılı ince film transistör üretim aşamaları, a) ITO aşındırma, b) Perovskit ve dielektrik katmanlarının kaplanması, c) Al savak kaynak elektrotlarının kaplanması.



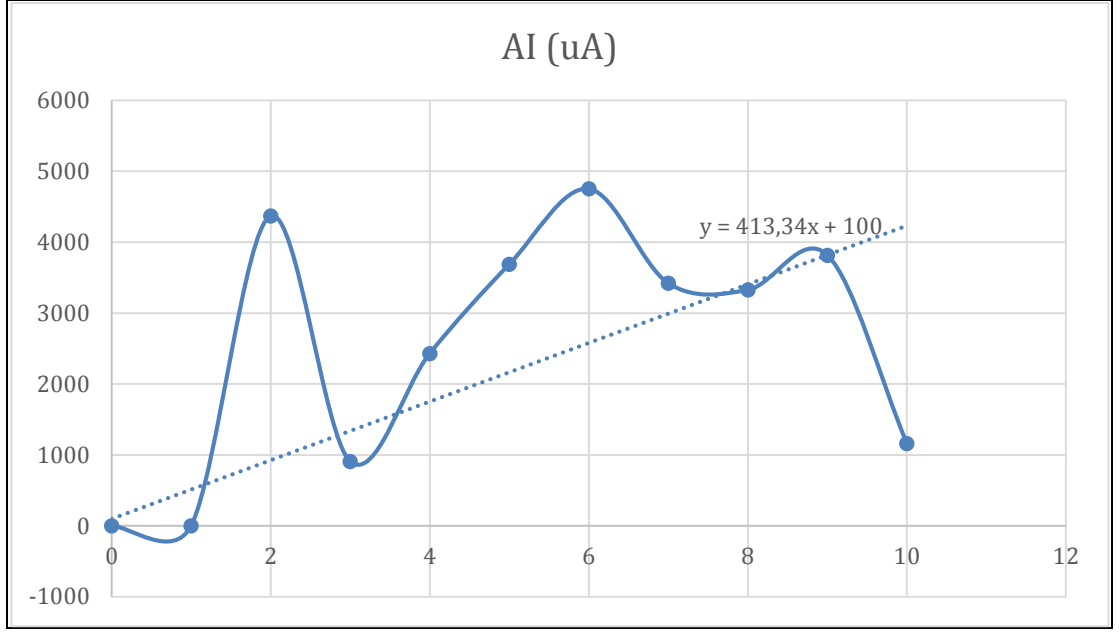
Şekil 4.7: İnce film transistör üretimi ve karakterizasyonunda kullanılan, a) Mbraun eldivenli kutu sistemi ve, b) Keithley 4200-SCS yarıiletken karakterizasyon sistemi.

İlk denemelerde dielektrik tabakası olarak SU8 polimeri kullanıldı. Fakat yapılan deneylerde kaynak kapı elektrotu arasındaki kaçak akımın çok fazla olduğu görüldü.

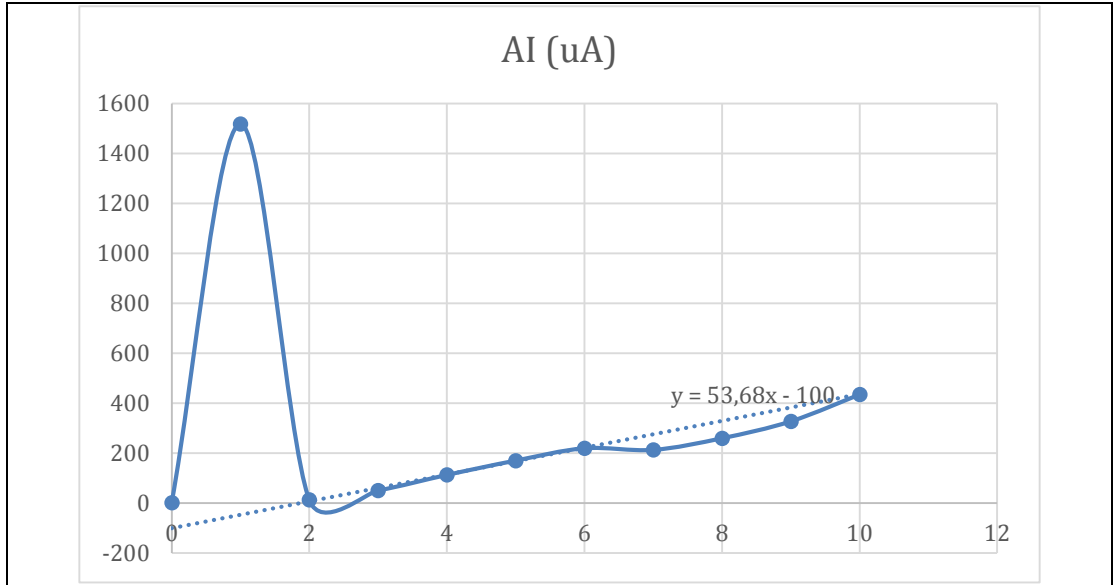


Şekil 4.8: I_{KS} ve I_{KS} 'nin V_{KK} 'ya göre değişimi. $V_{KAPI}=V_{KAYNAK}=0$.

Şekil 4.8'de görüldüğü üzere kaynaktan çıkan akımın büyük çoğunluğu kapı elektrotu üzerinden akmaktadır. Bunun üzerine kaynak-kapı ve kaynak-savak elektrotları arasındaki direnç doğrudan ölçüldü.



Şekil 4.9: Kapı ve kaynak arasında Ortalama akımın ortalama Voltaja göre değişimi.



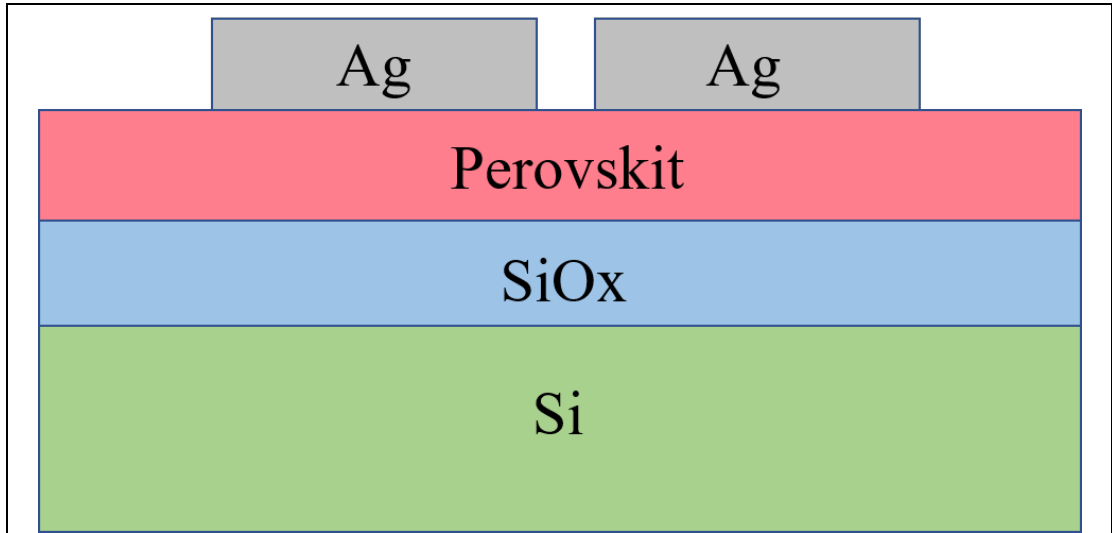
Şekil 4.10: Savak ve kaynak arasında Ortalama akımın ortalama Voltaja göre değişimi.

Doğrudan direnç ölçümlerinde de savak-kaynak arasındaki direncin kapı-kaynak arasındaki dirence göre yaklaşık 8 kat daha büyük olduğu gözlemlendi ve ilk bulgularla uyumlu olduğu görüldü. Bunun üzerine çeşitli kalınlıklardaki farklı kapı dielektriği malzemelerinin dirençleri ölçüldü:

- SU8 2000.5 (500 nm): $2.3 \times 10^5 \Omega$
- SU8 2005 (5 μm): $2.7 \times 10^{10} \Omega$
- Spin-On-Glass (600 nm): $3.5 \times 10^4 \Omega$

Spin-On-Glass 'ın SU8'e göre daha camsı özellik göstermesi gerektiğinden bu malzeme ile yapılan filmde daha yüksek bir direnç bekleniyordu. Direncin düşük çıkmasının nedeni olarak proses esnasında filmde oluşan muhtemel çatlak ve iğne delikleri gösterilebilir. SU8 2005'in kalınlığına göre SU8 2000.5'ten 100 kat daha iyi performans göstermesi nedeniyle bu film ile cihazlar üretildi fakat kapı dielektriği kalınlığının çok fazla olması nedeniyle kapılama davranışı gözlemlenemedi.

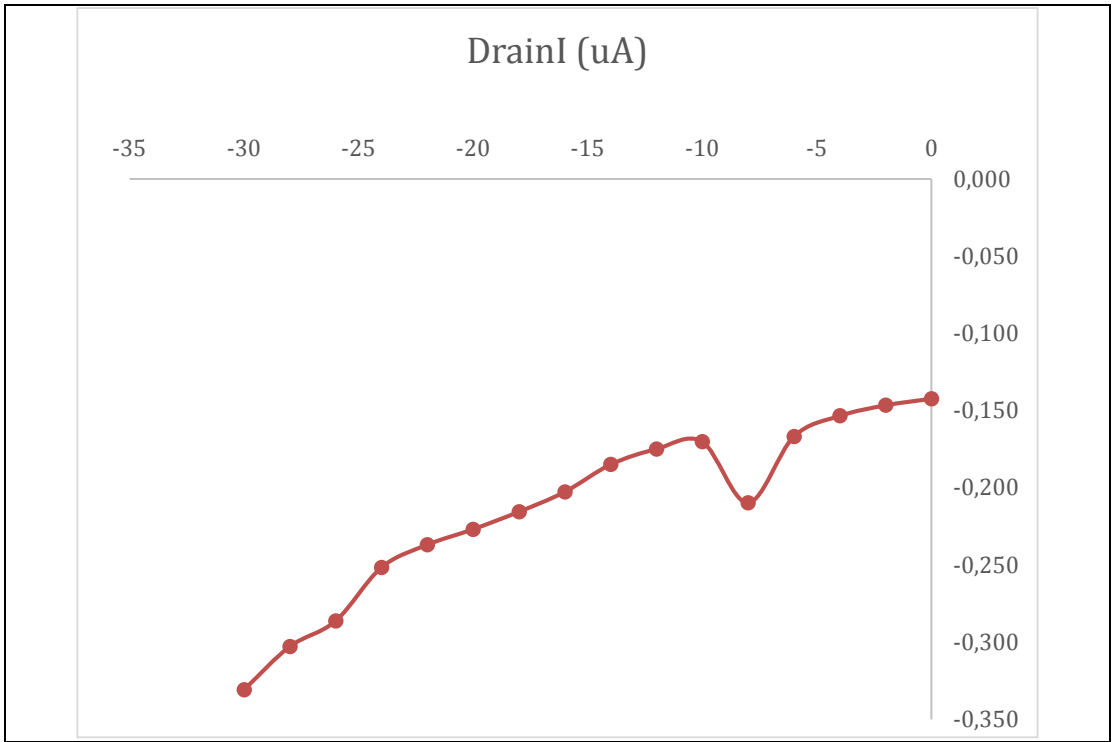
Çözültiden işlenebilir yöntemlerden beklenen performans alınamadığından kapı dielektriği olarak SiOx kullanılmasına karar verildi. Bunun üzerine Sabancı Üniversitesi SUNUM Laboratuvarındaki Oxford PECVD sisteminde silisyum yonga üzerinde 300 nm SiOx film büyütüldü. SiOx film üzerinde önceki bölümlerde anlatılan yöntemler kullanılarak perovskit filmi kaplandı. Bunun üzerine gölge maske metodu ile gümüş kaplanarak cihaz alttan kapılı TFT cihazlar tamamlandı.



Şekil 4.11: Silisyum yonga üzerinde üretilen alttan kapılı TFT cihazların şematiği.

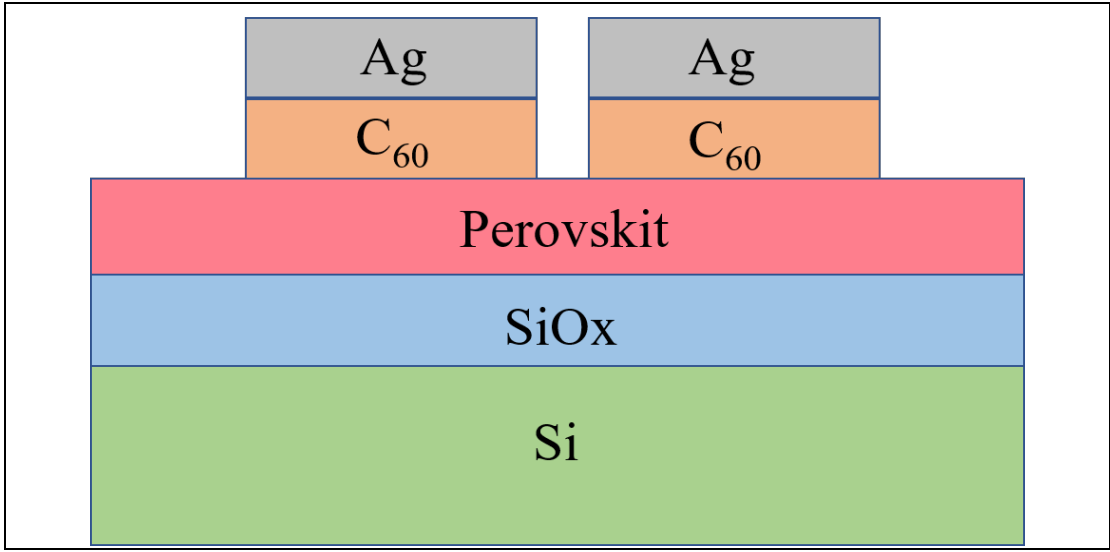


Şekil 4.12: Savak ve kaynak elektrotları için kullanılan gölge maske.

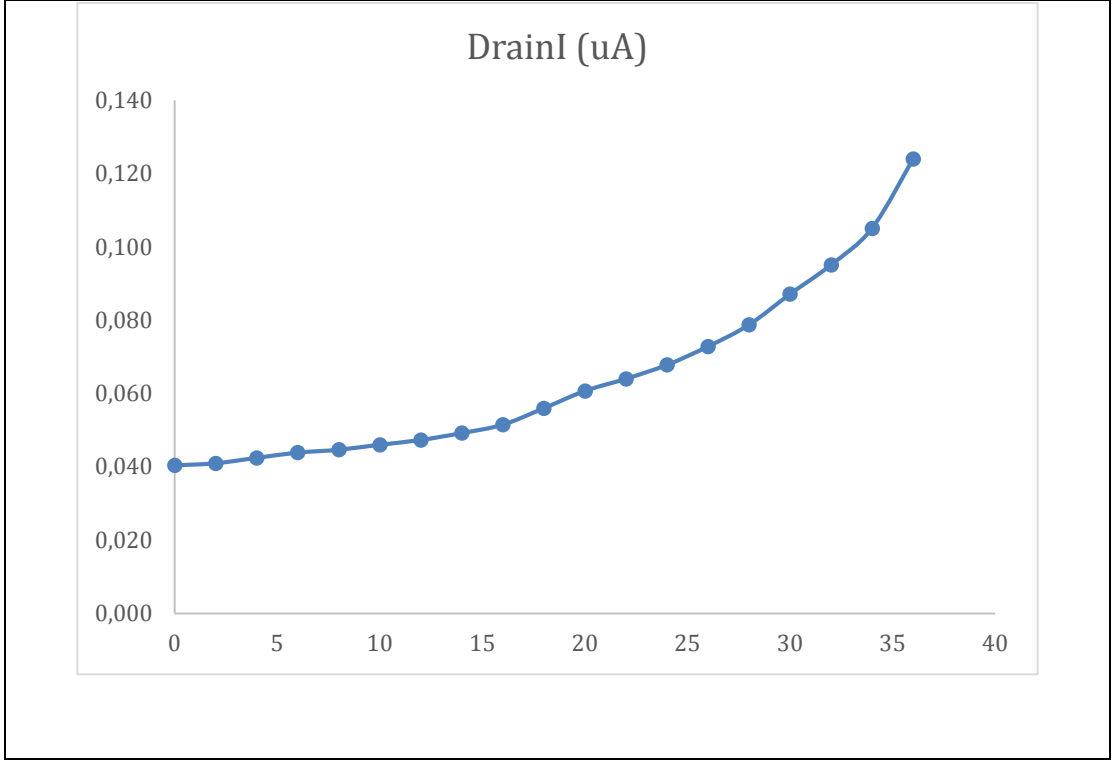


Şekil 4.13: I_{KS} 'nin V_{KK} 'ya göre değişimi. $V_{KS} = -40V$.

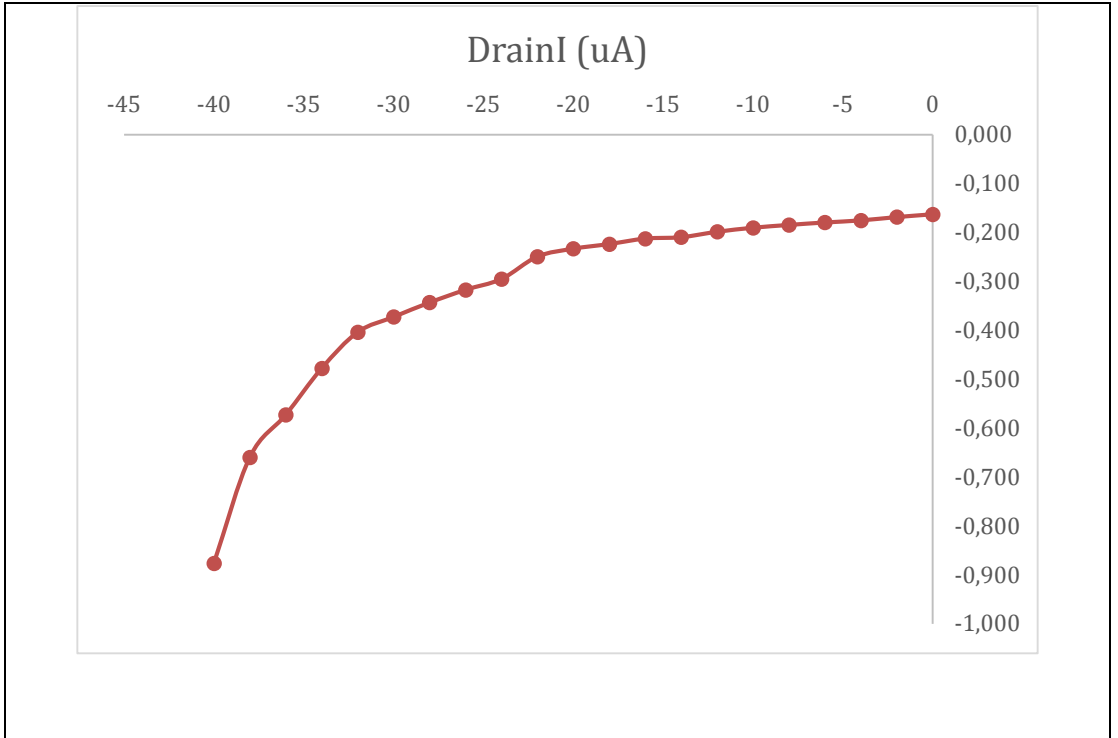
Bu cihazlarda her ne kadar kapılama davranışı belirgin şekilde gözlemlenemese de kaçak akım probleminin büyük oranda çözüldüğü görüldü. Kapılama davranışı gözlenememesinde ana etmen olarak, gümüş kontaklar ile perovskit film arasında Schottky bariyeri olabileceği ve bu nedenle yük taşıyıcılarının beklenen şekilde kanala nüfuz edememesi öngörüldü. Bu görüşten hareketle Ohmik kontak oluşturabilmek için gümüş kontaklar ile perovskit film arasına organik buharlaştırma yöntemi ile C_{60} kaplandı. Bu aşamada yine TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü bünyesinde bulunan MBraun eldivenli kutu sistemine entegre bir organik buharlaştırma sistemi kullanıldı.



Şekil 4.14: Ohmik kontaklı TFT cihaz şematiği.



Şekil 4.15: I_{SK} 'nın V_{KK} 'a göre değişimi. $V_{SK}=30$ V.



Şekil 4.16: I_{SK} 'nın V_{KK} 'a göre değişimi. $V_{SK}=-30$ V.

Her iki bölgede de V_{KK} ile I_{SK} arasında kuadratik ilişki gözlemlendi. Bu nedenle üretilen TFT'lerin ambipolar özellik gösterdiği iddia edilebilir. Doyum bölgesinde I_{SK} ile V_{KK} arasındaki ilişki eşitlik (3.19) ve (3.20)' de görüldüğü üzere I_{SK} 'nın karekökü ile V_{KK} arasındaki ilişkiye bakılarak $V_{EŞİK}$ ve mobilite hakkında çıkarım yapmak mümkündür.

Burada C_{KAPI} birim alana düşen kapasitansı simgeler:

$$C_{KAPI} = \epsilon_0 \epsilon_r / d \quad (3.21)$$

PECVD ile büyütülen SiOx tabakası için bu değerler yaklaşık olarak:

- $\epsilon_r = 3.9$
- $d = 300 \text{ nm}$

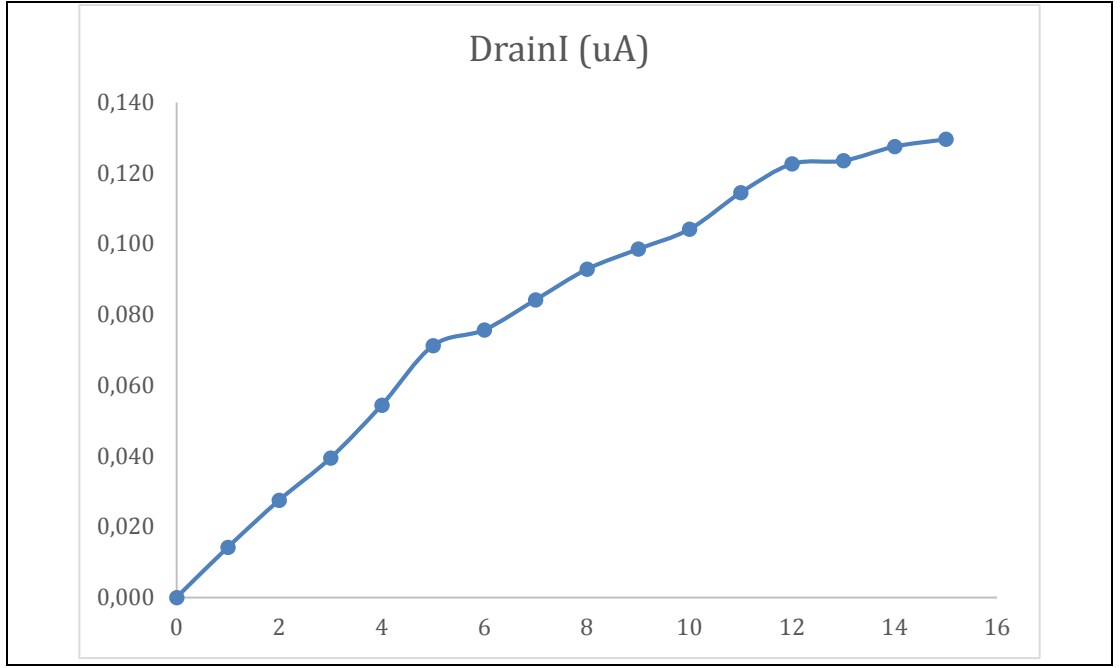
Kullanılan gölge maske için W ve L değerleri ise:

- $W = 4 \text{ mm}$
- $L = 100 \text{ m}$

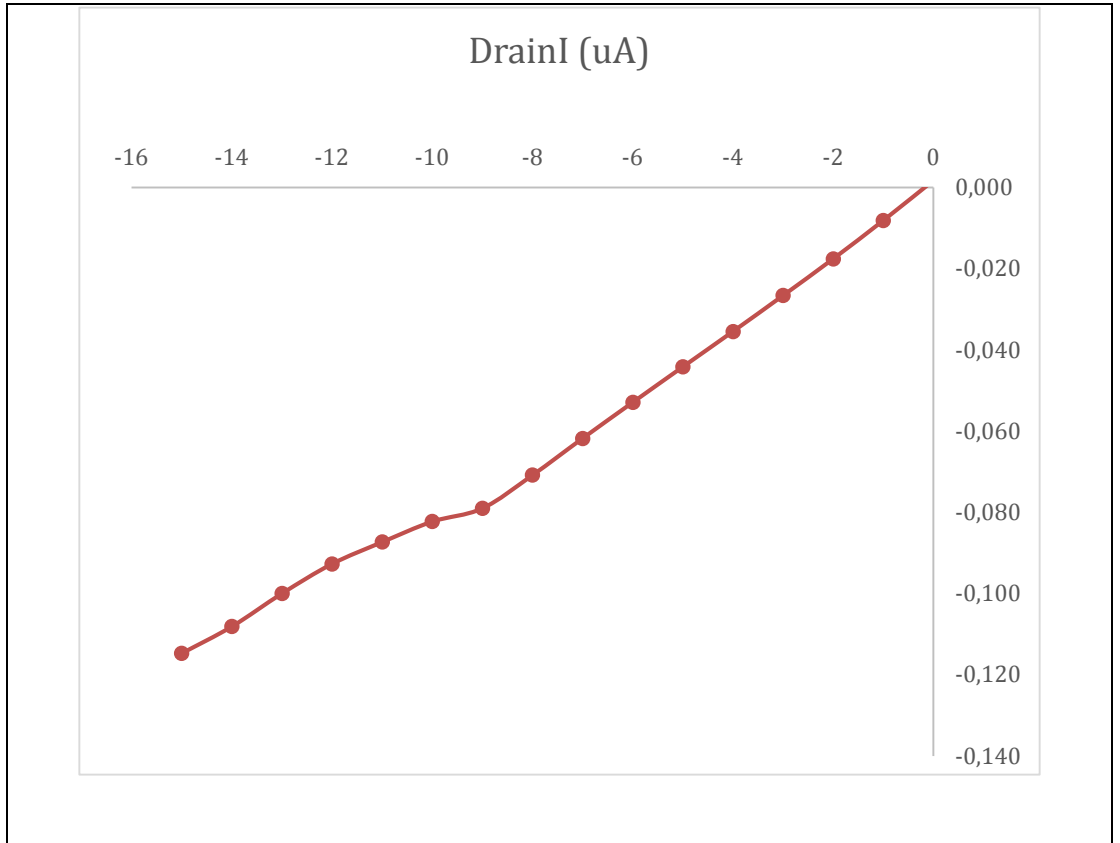
Parametreler yerine konulduğunda eşik voltajı, n-tipi ve p-tipi alan-etkili mobilite değerleri şöyle bulunur:

- $V_T^n = 2.6 \text{ V}$
- $V_T^p = -9.9 \text{ V}$
- $\mu_n = 2.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V.s}$
- $\mu_p = 2.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V.s}$

Aynı cihazlar için I_{SK} 'nın V_{SK} 'a göre değişimine de bakıldı.



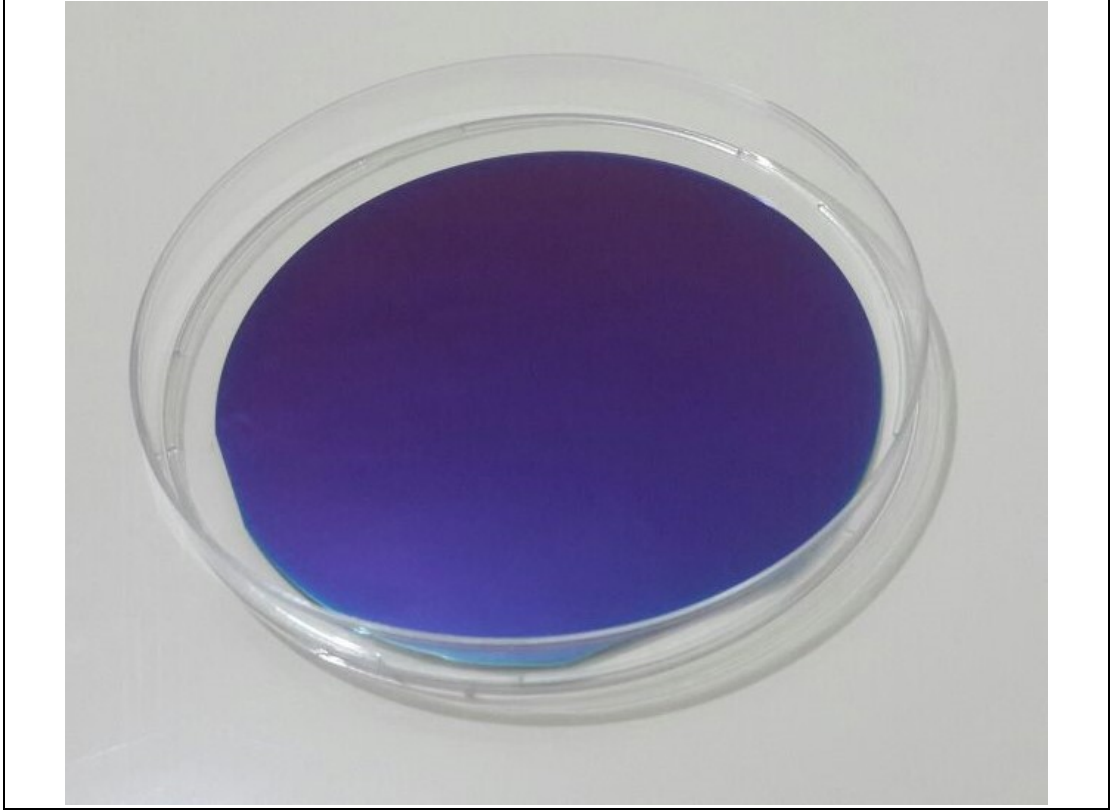
Şekil 4.17: I_{SK} 'nın V_{KK} 'a göre değişimi $V_{KK}=0$ V.



Şekil 4.18: I_{SK} 'nın V_{KS} 'e göre değişimi. $V_{KK}=-10$ V.

Her iki bölgede de cihazların tam doyumuna ulaşmadığı gözlemlendi. Bu da düşük mobilite değerlerine bağlanabilir. Mobilite değerlerinin beklenenden küçük olduğu görüldü. Bunda alan-etkili mobilite değerlerinin genel olarak hacimsel (bulk) mobilite değerlerinden düşük olması etkilidir. Bunun yanı sıra karakterizasyon işlemleri, eldivenli kutu sistemine entegre bir karakterizasyon cihazı olmadığından, oda şartlarında gerçekleştirildiği için TFT cihazlarda karakterizasyon öncesi ve esnasında bir miktar degradasyon olması beklenebilir. Bu durum TFT cihazların enkapsülasyonuna izin veren daha kompleks cihaz geometrileri tasarlanarak veya ölçümleri eldivenli kutu içinde gerçekleştirerek aşılabılır. Son olarak perovskit filminin kalitesi TFT cihaz performansı için en önemli faktördür. Filmdeki iğne deliklerinin azaltılması, çatlakların engellenmesi, tanecik boyutunun büyütülmesi mobiliteye olumlu yönde etki eder. Ayrıca perovskitin gerek SiO_x gerekse C₆₀ filmleri ile yapmış olduğu ara yüzlerde tuzak yük olmaması, yük transferi açısından önem arz etmektedir. Sonuç olarak mobilitenin iyileştirilmesi için perovskit filminin ve ara yüzlerin optimizasyonu konusunda daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

Bu doğrultuda kapı dielektriği olarak SiO_x'e nazaran daha yüksek dielektrik fonksiyonuna sahip SiN_x filminin kullanılmasına karar verildi. Bu amaçla Sabancı Üniversitesi SUNUM laboratuvarında Şekil 4.19'da görüldüğü üzere Si yonga üzerinde SiN_x filmi büyütüldü fakat yüksek lisans dönemi içerisinde TFT cihaz üretimi ve karakterizasyonu için süre kalmadığından bu çalışmalar doktora dönemine bırakıldı.



Şekil 4.19: Silisyum yonga üzerine büyütülen SiNx filmi.

5. SONUÇ

Tezin ana amacı olan perovskit tabanlı TFT’lerde ambipolar özellik gösterildi, n-tipi ve p-tipi alan etkili mobilite değerleri deneysel veriler kullanılarak hesaplandı. Çözültiden işlenebilir kapı dielektriklerinde kaçak akım problemi gözlemlendiğinden esnek taban üzerinde denemelere geçilemedi fakat gerek kullanılan malzemelerin özellikleri gerekse TFT cihaz geometrisi açısından esnek tabana geçiş bir optimizasyon problemi olarak görülmektedir. TFT karakterizasyonunun daha sağlıklı olması için karakterizasyon sisteminin eldivenli kutuya entegrasyonu, yapılması planlanan çalışmalar arasındadır. Alan-etkili mobilite değerlerinin iyileştirilmesi için TFT cihazlarda kullanılan perovskit, dielektrik katmanlarının ve film ara yüzlerinin daha da optimize edilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda SiO_x katmanı yerine kapı dielektriği olarak SiN_x kullanılması yönünde çalışmalar başlatılmıştır. Doktora çalışmalarının bu yönde ilerlemesi öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Gelinck G., Heremans P., Nomoto K., Anthopoulos T. D., (2010), "Organic Transistors in Optical Displays and Microelectronic Applications", *Advanced Materials*, 22 (34), 3778-3798.
- [2] Angione M. D., Pilolli R., Cotrone S., Magliulo M., Mallardi A., Palazzo G., Sabbatini L., Fine D., Dodabalapur A., Cioffi N., Torsi L., (2011), "Carbon Based Materials for Electronic Bio-sensing", *Materials Today*, 14 (9), 424-433.
- [3] Kamiya T., Hosono H., (2010), "Material Characteristics and Applications of Transparent Amorphous Oxide Transistors", *NPG Asia Materials*, 2, 15-22.
- [4] Sekitani T., Zschieschang U., Klauk H., Someya T., (2010), "Flexible Organic Transistors and Circuits with Extreme Bending Stability", *Nature Materials*, 9, 1015-1022.
- [5] Sirringhaus H., Tessler N., Friend R. H., (1998), "Integrated Optoelectronic Devices Based on Conjugated Polymers", *Science*, 280 (5370), 1741-1744.
- [6] Steudel S., Myny K., Schols S., Vicca P., Smout S., Tripathi A., van der Putten B., van der Steen J.-L., van Neer M., Schuetze F., Hild O. R., van Veenendaal E., van Lieshout P., van Mil M., Genoe J., Gelinck G., Heremans P., (2012), "Design and Realization of a Flexible QVGA AMOLED Display with Organic TFTs", *Organic Electronics*, 13, 1729-1735.
- [7] Noda M., Kobayashi N., Katsuhara M., Yumoto A., Ushikura S., Yasuda R., Hirai N., Yukawa G., Yagi I., Nomoto K., Urabe T., (2011), "An OTFT-driven Rollable OLED Display", *Journal of the Society of Information Display*, 19, 316-322.
- [8] Mei Y., Jurchescu O. D., Zhang C., Vardeny Z. V., (2015), "Electrostatic Gating of Hybrid Halide Perovskite Field-Effect Transistors: Balanced Ambipolar Transport at Room-Temperature", *MRS Communications*, 21, 1
- [9] Green M. A., Ho-Baille A., Snaith H. J., (2014), "The Imergence of Perovskite Solar Cells", *Nature Photonics*, 8 (7), 506-514.
- [10] Bretschneider S. A., Weickert J., Dorman J. A., Schmidt-Mende L., S. A., (2014), "Research Update: Physical and Electrical Characteristics of Lead Halide Perovskites for Solar Cell Applications", *APL Materials*, 2, 040701.
- [11] Zhou, H., Chen Q., Li G., Luo S., Song T.-B., Duan H.-S., Hong Z., You J., Liu Y., Yang Y., (2014), "Interface Engineering of Highly Efficient Perovskite Solar Cells", *Science*, 345, 542.
- [12] Tan, Z.-K., Moghaddam R. S., Lai M. L., Docampo P., Higler R., Deschler F., Price M., Sadhanala A., Pazos L. M., Credgington D., Hanusch F., Bein T.,

- Snaith H. J., Friend R. H. (2014), "Bright Light-emitting Diodes Based on Organometal Halide Perovskite", *Nature Nano*, 9, 687-692.
- [13] Jung H. S., Park N.-G., (2015), "Perovskite Solar Cells: From Materials to Devices", *Small*, 11 (1), 10-25.
- [14] Im, J.-H., Chung J., Kim S.-J., Park N.-G., (2012), "Synthesis, Structure, and Photovoltaic Property of a Nanocrystalline 2H Perovskite-type Novel Sensitizer (CH₃CH₂NH₃)PbI₃", *Nanoscale Research Letters*, 7, 353.
- [15] Pang, S., Hu H., Zhang J., Lv S., Yu Y., Wei F., Qin T., Xu H., Liu Z., Cui G., (2014), "NH₂CH=NH₂PbI₃: An Alternative Organolead Iodide Perovskite Sensitizer for Mesoscopic Solar Cells", *Chemistry of Materials*, 26 (3), 1485-1491.
- [16] Tidhar, Y., Edri E., Weissman H., Zohar D., Hodes G., Cahen D., Rybtchinski B., Kirmayer S., (2014), "Crystallization of Methyl Ammonium Lead Halide Perovskites: Implications for Photovoltaic Applications", *Journal of the American Chemical Society*, 136 (38), 13249-13256.
- [17] Noh, J. H., Im S. H., Heo J. H., Mandal T. N., Seok S. I., (2013), "Chemical Management for Colorful, Efficient, and Stable Inorganic–Organic Hybrid Nanostructured Solar Cells", *Nano Letters*, 13 (4), 1764-1769.
- [18] Cai, B., Xing Y., Yang Z., Zhang W.-H., Qiu J., (2013), "High Performance Hybrid Solar Cells Sensitized by Organolead Halide Perovskites", *Energy and Environmental Science*, 6, 1480-1485.
- [19] Sheng, C. X., Zhang C., Zhai Y., Mielczarek K., Wang W., Ma W., Zakhidov A., Vardeny Z. V., (2015), "Exciton versus Free Carrier Photogeneration in Organometal Trihalide Perovskites Probed by Broadband Ultrafast Polarization Memory Dynamics", *Physical Review Letters*, 114, 116601.
- [20] Kyminis, I., (2008), "Transistors Theory, Fabrication and Characterization" , Springer Science Business Media.
- [21] Xiao, Z., Cheng B. Shao Y., Dong Q., Wang Q., Yuan Y., Wang C., Gao Y., Huang J., (2014), *Energy and Environmental Science*, 7, 2619-2623.
- [22] Chen, Y., Peng J., Su D., Chen X., Liang Z., (2015), "Efficient and Balanced Charge Transport Revealed in Planar Perovskite Solar Cells", *ACS Applied Materials and Interfaces*, 7 (8), 4471-4475.
- [23] Kwon, Y. S., Lim J., Yun H.-J., Kim Y.-H. Park T., (2014), "A Diketopyrrolopyrrole-Containing Hole Transporting Conjugated Polymer for Use in Efficient Stable Organic–Inorganic Hybrid Solar Cells Based on a Perovskite", *Energy and Environmental Science*, 7, 1454-1460.

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında İstanbul’da doğdu. 2005 yılında Fatih Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünü kazandı. Bir yıl yabancı dil hazırlık eğitimi aldıktan sonra eğitim dili İngilizce olan Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünden 2010’da mezun oldu. 2010-2012 yılları arasında Milli Eğitim Müdürlüğü’nde öğretmenlik yaptı.

2012 yazında ABD’de Teaching House Boston’da ESL kursuna devam gitti. 2013 yılında CSGB Resa Eğitim Kurumları’ndan C Sınıfı İş Sağlığı ve Güvenliği Sertifikası aldı. 2014 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında “Perovskit Tabanlı Esnek Ambipolar İnce Film Transistörler” konusunda yüksek lisans eğitimine başladı. Tez konusu TÜBİTAK tarafından BİDEB 2210-C programı ile desteklenmiştir. Evli ve 2 çocuk annesidir.